تأثیر مقاومت بتن و چسبندگی ورق‌های CFRP بر مقاومت نهایی تیرهای بتنی★

محمود نادری[۱]   علی خونساری[۲]

چکیده *در میان روش‌های مختلف مقاوم‌سازی استفاده از ورق‌های پلیمری مسلح به الیاف FRP با استقبال روبه‌رشدی مواجه بوده است. در استفاده از FRP، مقاومت سطحی بتن بستر تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر مقاومت چسبندگی بین FRP و بتن دارد. لذا در این تحقیقات، مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی بیست نمونه تیر بتنی ساخته شده از پنج مقاومت مختلف بتن به انجام رسیده است. با این‌که نیمی از نمونه‌های یاد شده با ورق‌های CFRP تقویت شده‌اند ولی نیمی دیگر به‌عنوان شاهد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تقویت تیر ها به‌صورت سه‌وجهی با ورق‌های پلیمری مسلح به الیاف کربنی تک‌سویه CFRP صورت گرفته است. مقاومت چسبندگی CFRP به بستر بتنی با استفاده از روش «پیچش» به‌طور مستقیم اندازه‌گیری گردیده است و نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل از شکست نمونه‌ها در آزمایش استاندارد خمشی مقایسه گردیده‌اند. در نهایت تأثیر مقاومت سطحی بتن و مقاومت چسبندگی CFRP به بتن، بر مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP ارائه شده است.*

واژه‌های کلیدی آزمون پیچش، مقاومت بتن، تیر بتنی، چسبندگی، CFRP.

The Effect(s) of Concrete Strength and its Bond to CFRP sheets on the Ultimate Strength of Concrete Beams

M. Naderi   A. Khonsari

Abstract *Among the systems used for Retrofitting and Strengthening of structures, FRP systems seem to be more popular. When using FRP, the surface strength of concrete plays major role in producing sufficient adhesion between FRP laminates and concrete. Therefore, this paper is devoted to the findings of research on five different concrete strength that were used in manufacturing concrete beams for Retrofitting. In total twenty beams were prepared for studying the changes in adhesion between concrete and CFRP layers. While half of the beams were wrapped with CFRP's, the other half were left as they were for comparative studies. The adhesion of CFRP layers on concrete beams were measured by new Twist-off method and the results were compared with those obtained from standard flexural testing of the beams. Finally, the effect of concrete surface strength and the bond strength of the CFRP on the ultimate strength of the strengthened beams have been assessed.*

Keywords Twist-off Method, Concrete Strength, Concrete Beam, Adhesion, CFRP.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۱۰/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/٤/٤ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره).

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره).

مقدمه

باتوجه به تمرکز انبوه ساختمان‌ها در کنار یکدیگر، اقدامات مربوط به بازسازی و مرمت سازه‌های موجود به‌عنوان جایگزینی برای تخریب و احداث سازه‌های جدید همواره مورد توجه بوده‌اند. چون به‌طور معمول برای سازه‌های بتنی مسلح طول عمری بین ۸۰ تا ۱۰۰ سال پیش‌بینی می‌شود سازه‌ی مورد نظر می‌بایست توان پاسخ‌گویی به نیازهای گوناگون در طی این زمان را دارا باشد؛ اما مشکل این‌جاست که در زمان طراحی و ساخت سازه‌ها، تمام نیازها قابل پیش‌بینی نیستند. علی‌رغم تمایل روبه‌رشد استفاده از ورق‌های FRP برای تقویت و افزایش عمر این سازه‌ها، یکی از مواردی که هنوز درک کلی از آن وجود ندارد، چسبندگی سطحی و پیوستگی بین سیستم‌های تعمیری و مقاوم‌سازی با بتن بستر است. چسبندگی ضعیف FRPبه بتن و پایین بودن مقاومت سطحی بتن، مقاومت ناشی از اعمال FRP را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد و سبب شکست‌های زودرس و غیرمنتظره می‌شود که در نتیجه امنیت و کاراییFRPهای چسبانده شده به خارج اعضای بتنی را از دید دست‌اندرکاران مورد سؤال قرار داده است [1].

در پی چسباندن یک طرفه‌ی ورق‌های تقویتی به سطح خارجی بتن، پیوستگی از طریق بتن دور تا دور وجود ندارد [2] و مقاومت سطحی بتن که معمولاً به‌دلیل آسیب‌دیدگی، هوازدگی و عوامل محیطی و بهره‌برداری کاهش یافته است، تعیین‌کننده‌ی استحکام اتصال می‌باشد [3].

اطلاع از مقاومت واقعی در جای بتن برای اطمینان از کیفیت کارهای جدید انجام شده، تأثیر عوامل محیطی و بهره‌برداری بر سازه‌ی بتنی موجود و مقاصد ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها امری ضروری می‌باشد. لذا شرایط و مقاومت بتن بستر باید به‌منظور تعیین ظرفیت مقاوم‌سازی با FRP بررسی شود و محاسبه گردد. از جمله آخرین روش‌های ابداعی تعیین مقاومت سطحی، روش درجای «پیچش» است [4] که از مزایای آن می‌توان به سادگی، دقت بالا، ضریب تغییرات کم، سرعت انجام، هزینه‌ی اندک، آسیب جزئی و قابلیت تکرار بالای آن اشاره نمود. هم‌چنین انجام این روش نیاز به مهارت و برنامه‌ریزی قبلی ندارد و محدودیت ابعاد نمونه، مشکلی در انجام آزمون پدید نمی‌آورد [5].

اگرچه بسیاری از تحقیقات با افزایش مقاومت بتن، افزایش در مقاومت چسبندگی نهایی را نشان می‌دهند، روابط توانی وابسته به مقاومت بتن نشانگر اختلافاتی در این زمینه می‌باشند. با این‌که مراجع [6-9] به‌ترتیب روابط خطی متناسب با $f_C'^{0.19}, f_C'^{1/5}, f_C'^{2/3}, f_C'^{1/2}$ را ارائه کرده‌اند ولی فرضیات صورت گرفته در این منابع تنها بر پایه‌ی تعداد کمی داده‌های آزمایشگاهی بوده است که نمی‌تواند نتیجه‌ای را از مقاومت چسبندگی و وابستگی آن به مقاومت بتن ارائه نماید. از طرف دیگر، آزمایش‌های انجام شده توسط Sena – Cruz et al [10] تأثیر کمی از مقاومت بتن بر مقاومت چسبندگی را ارائه کرده است. لذا بررسی بیشتر بحث تأثیر مقاومت بتن بر مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP به بتن ضروری به‌نظر می‌رسد که به همین دلیل در تحقیقات حاضر برای تعیین مقاومت درجای بتن از روش «پیچش» استفاده شده است.

از جمله دیگر عوامل تأثیرگذار بر مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP به بتن، آماده‌سازی سطوح می‌باشد. حتی مدت‌ها قبل از کابرد FPR، تحقیقاتی در زمینه‌ی تأثیر زبری سطح بر مقاومت چسبندگی بتن به بتن انجام شده است [11-15]. در زمینه‌ی تأثیر آماده‌سازی سطح در استفاده از FRP تحقیقاتی در مراجع [16-21] موجود می باشند که نتایج این بررسی‌ها حاکی از آن است که آماده‌سازی سطوح با روش‌های استفاده از فشار آب و ماسه‌پاشی، بهترین روش‌ها برای ایجاد چسبندگی موثر FRP به بتن بستر می‌باشند.

باید توجه داشت که ویژگی‌های چسب مورد

استفاده نیز بر مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP به بتن تأثیرگذار می‌باشد. بنا به گزارش‌های موجود، هرچه چسب مورد استفاده نرم‌تر باشد مقاومت چسبندگی بیشتر خواهد بود [22,23]. به‌علاوه تحقیقاتی نیز در مراجع [24,25] در ارتباط با ترکیب و نوع چسب‌ها انجام شده است. هم‌چنین در تحقیقات عددی اخیر توسط Benyoucef et.al [26] نشان داده شده است که افزایش ضخامت لایه‌ی چسب منجر به کاهش قابل‌توجهی در تنش‌های قابل تحمل سطحی می‌شود. هم‌چنین با توجه به بررسی‌های M.Arduni و A.nanni [27]، تنش‌های عمودی وارد بر سطح اتصال به‌طور مستقیم متناسب با ضخامت چسب صورت می‌گیرد. بنابراین لایه‌های چسب نازک‌تر احتمال خرابی و جداشدگی اتصال بتن- چسب را کاهش می‌دهند. این محققان، اثر پارامترهای گوناگون بر نسبت افزایش مقاومت نهایی در مقاوم‌سازی خمشی تیرهای با تکیه‌گاه ساده را بررسی نموده‌اند و نتایج به‌دست آمده بیانگر آنست که برای مقاومت ثابت بتن، با کاهش سختی FRP، عملاً اثر جداشدگی نقش کمتری ایفا می‌نماید.

اهداف مطالعه

باید توجه داشت که مقاومت بستر بتنی در مقاوم‌سازی‌های خمشی و برشی، چسبندگی بین لایه‌ی FRP و بتن بستر بسیار مهم می‌باشد چون بتن بستر باید مقاومت کافی برای تحمل تنش‌های کششی مستقیم و برشی، و انتقال آنها به FRP را دارا باشد. جداشدگی FRP در تیرهای بتنی مسلح، معمولاً در نقاط با تمرکز تنش بالا، در نزدیکی نقاط انتهایی، مواضع قطع FRP و مکان‌های وجود ترک‌ها در لایه‌ی زیرین بتن زمانی رخ می‌دهد که نیروی داخلی ورق FRP نتواند توسط تنش‌های برشی بین دو ماده به لایه‌های زیرین منتقل شود [27].

مسیر گسترش جدا شدگی به مشخصات بتن بستر، FRP و سطح مشترک (چسب) وابسته است و بالطبع مسیر حداقل مقاومت را پیش می‌گیرد که با توجه به بررسی تحقیقات انجام شده معمولاً در بتن می‌باشد [28]. معمولاً جداشدگی FRP از سطح بتن در بارهای کمتر و به‌صورت ترد رخ می‌دهد که خرابی قابل‌توجهی به بار می‌آورد. باید توجه داشت که سطح یک قطعه‌ی بتنی به‌دلیل تأثیرپذیری از میزان فشردگی در قالب، تماس با روغن‌های قالب‌بندی، هیدراسیون ناکافی سیمان در سطح بتن و هم‌چنین تأثیر عوامل آسیب رسان محیطی، تفاوت‌های فاحشی با مقاومت داخلی قطعه‌ی بتنی دارد [29,30]. لذا روش «پیچش» به‌دلیل اندازه‌گیری مستقیم مقاومت سطحی بتن و مقاومت چسبندگی ورق‌های CFRP به بتن بستر، انتخاب و با انجام آن تأثیر مقاومت سطحی بتن بر مقاومت چسبندگی CFRP به بستر مورد ارزیابی قرارگرفته است. نهایتاً تأثیر عوامل یاد شده بر میزان افزایش مقاومت نهایی خمشی و برشی در تیرهای تقویت شده با CFRP نیز ارائه گردیده است.

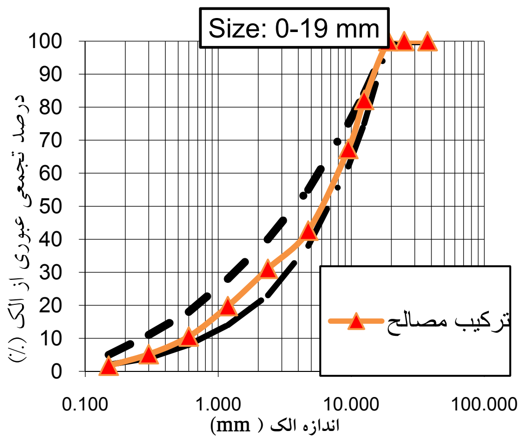
ساخت نمونه‌ها

طی این تحقیقات، از پنج طرح اختلاط بتن با حداکثر اندازه‌ی سنگدانه ۲۰ میلی‌متر بهره گرفته شده است. ورق‌های CFRP به‌کار گرفته شده از مقاومت کششی ٤۹۰۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۳۰ گیگاپاسکال به ضخامت ۰/۱۱۱ میلی‌متر برخوردار بوده است. هم‌چنین چسب مورد استفاده، از نوع اپوکسی با نسبت اختلاط مؤلفه‌ها ۱ به ۰/۵۸ (رزین و سخت کننده) می‌باشد که با توصیه‌ی فراهم آورنده‌ی CFRP انتخاب گردیده است.

برای تهیه‌ی بتن با کیفیت مناسب، دانه‌بندی سنگدانه‌ها با توجه به منحنی دانه‌بندی شکل شماره‌ی (۱) انتخاب شده است. هم‌چنین بر مبنای دانه‌بندی ماسه، ضریب نرمی ماسه برابر ۲/۳ می‌باشد.

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از آزمایش سنگدانه‌ها و اطمینان از کنترل کیفیت دانه‌های سنگی، اقدام به طرح اختلاط بتن برای گستره‌ی مقاومت ۱۵

الـی ۳۵ مگاپاسـکال گردیـد. بـه ایـن منظـور از روش گام‌به‌گام ACI 211.1 با انتخاب حداکثر قطر سـنگدانه ۲۰ میلی‌متر و اسـلامپ ۳۰ تـا ۵۰ میلـی‌متـر و درصـد تقریبی هوای ۲ درصد برای بتن معمولی اسـتفاده شـد. نسبت‌های آب به سیمان استفاده شـده بـه‌ترتیـب ۰/۷، ۰/٦۱، ۰/۵، ۰/٤۲و ۰/۳ می‌باشند.

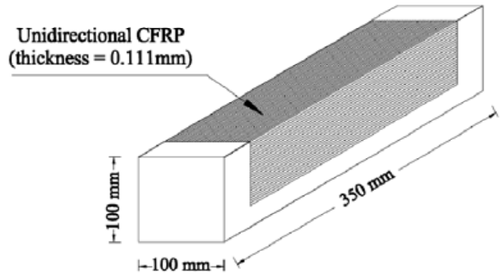


شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی

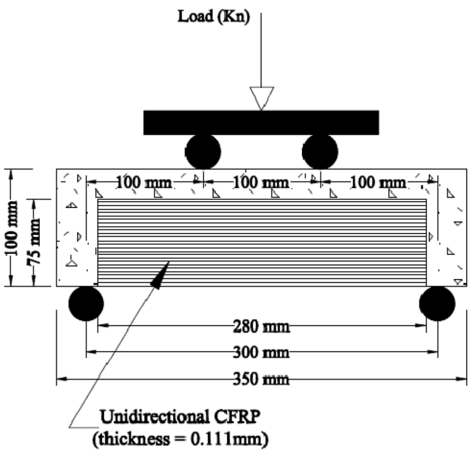
نمونه‌های بتنـی سـاخته شـده پـس از ۱٤ روز از داخل آب خارج و سطح آن‌هـا پـس از خشـک شـدن کامل با استفاده از سمباده و برس سیمی و هوای فشرده آماده‌سازی شدند. هدف از آماده‌سـازی سـطح، از بـین بردن هر نوع گرد و غبار و آلـودگی و لایـه‌ی ضـعیف سـطحی بـوده اسـت. بایـد توجـه داشـت کـه بـرای دست‌یابی به چسبندگی بلند مـدت، ملـزم بـه رعایـت استاندارد بالایی در آماده‌سازی سطح می‌باشیم [17,30]. پس از چسباندن ورق‌هـای CFRP بـه بـتن، بـه‌منظـور گیرش کامـل چسـب، نمونـه‌هـا بـه مـدت ۱٤ روز در محیط آزمایشگاهی قرار داده شدند.

به‌طور کلی ۲۰ تیر بتنی بـا ابعـاد ۱۰۰×۱۰۰×۳۵۰ میلی‌متر [31] ساخته شد که نمونـه‌ای از آنهـا بـه‌طـور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است.

بـرای هـر مقاومـت بتنـی، دو نمونـه بـه‌عنـوان نمونه‌های شاهد و دو نمونه برای مقاوم‌سازی با CFRP به‌صورت سوجهی با راستای الیـاف در جهـت طـولی تیر، مطابق شکل (۲) مورد استفاده قرار گرفتند. تمـامی تیرها تحت بارگذاری دو نقطـه‌ای در نقـاط یـک‌سـوم میانی (شکل ۳) مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۲ نحوه‌ی مقاوم‌سازی قسمت‌های زیرین و کناری تیرهای بتنی با CFRP



شکل ۳ ابعاد ورق CFRP و نحوه‌ی بارگذاری تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP

برای تعیین مقاومت فشاری بـتن مـورد اسـتفاده، برای هر طرح اختلاط، دو نمونه‌ی اسـتوانه‌ای بـا ابعـاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متـر و یـک نمونـه‌ی مکعبـی بـا ابعـاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متـر تهیـه و در سـن مـورد نظـر تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. مقاومـت‌هـای بـتن به‌دست آمده از آزمایش فشاری این نمونه‌ها بـه‌ترتیـب ۲۳/۰۳، ۲٦/٤۲، ۳٦/۱۳، ۳۹/٦۷ و ٤۳/٦۲ مگاپاسـکال می‌باشند.

آزمون «پیچش»

این آزمایش با توجه به آسیب وارد بر آن که بسیار سطحی و جزئی می‌باشد در طبقه‌بندی آزمایش‌های نیمه‌مخرب یا به‌طور دقیق‌تر با خرابی جزئی، قرار دارد. مواد و تجهیزات لازم برای آزمون «پیچش» عبارتند از:

۱- «آچار مدرج پیچش» که برای اندازه‌گیری لنگر پیچشی اعمال‌شده به نمونه‌ی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- استوانه‌ی فلزی با قطر ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر که برای انتقال لنگر پیچشی از آچار مدرج پیچش به بتن، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳- چسب مورد استفاده که از نوع رزین اپوکسی می‌باشد.

در روش «پیچش»، پس از تمیز کردن سطح، با استفاده از چسب رزین اپوکسی، استوانه‌ی فلزی یاد شده به سطح مورد آزمایش چسبانده می‌شود. پس از گیرش کامل چسب با به‌کارگیری آچار مدرج پیچش، به استوانه‌ی فلزی یاد شده، لنگر پیچشی وارد می‌گردد تا جسم مورد آزمایش در سطح خود دچار شکست گردد. با استفاده از لنگر پیچشی نهایی، مقاومت جسم مورد آزمایش محاسبه و یا با مراجعه به منحنی‌های کالیبراسیون موجود [5]، مقاومت‌های مستقیم و معادل موردنظر به‌دست می‌آیند. با توجه به این‌که در آزمون «پیچش»، شکست در خود جسم موردنظر اتفاق می‌افتد، لذا نتایج آن نسبت به آزمون‌های تعیین سختی سطح یا آزمون‌هایی که به‌طور غیرمستقیم مقاومت مصالح را تعیین می‌کنند، از اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد.

از روش «پیچش» می‌توان برای تعیین مقاومت بتن به‌منظور ارزیابی مقاومت بتن سازه‌های موجود، تعیین زمان قالب‌برداری، تعیین زمان حمل قطعات پیش‌ساخته، تعیین زمان اعمال نیروی پیش‌تنیدگی، تعیین روند خرابی (در مواردی که انتظار می‌رود خرابی سطح بتن در طول مدت زمان افزایش یابد)، تعیین مقاومت سطحی بتن به‌منظور اقدامات مقاوم‌سازی، اندازه‌گیری مقاومت چسبندگی لایه‌های تعمیری و تقویتی بتنی و لایه‌های تقویتی FRP استفاده نمود.

در استفاده از آزمون «پیچش» برای اندازه‌گیری مقدار چسبندگی لایه‌های تعمیری و تقویتی بتنی و لایه‌های تقویت CFRP به بتن، ابتدا به‌کارگیری مته‌ی الماسه، نیم‌مغزه‌ای در سطح لایه‌ی مورد نظر، به‌گونه‌ای ایجاد می‌گردد که عمق نیم‌مغزه حدود پنج میلی‌متر به درون بستر بتنی ادامه یابد. نفوذ ۵ میلی‌متری نیم‌مغزه به درون بستر بتنی به‌دلیل آن است که احتمال شکست نیم‌مغزه در مرز بین بتن بستر و لایه‌ی تعمیری فراهم آید. سپس با به‌کارگیری چسب اپوکسی استوانه‌ی فلزی به قطر ۵۰ میلی‌متر بر روی نیم‌مغزه ایجادشده چسبانده می‌شود. پس از سخت شدن چسب اپوکسی با استفاده از یک آچار مدرج پیچش، به استوانه‌ی فلزی یاد شده، لنگرپیچشی وارد می‌شود. این عمل ادامه می‌یابد تا نیم‌مغزه دچار شکست شود (شکل ٤). با تبدیل لنگر پیچشی به تنش برشی، معیاری برای تعیین مقاومت چسبندگی CFRP یا لایه‌ی تعمیری بتنی به بتن بستر به‌دست می‌آید.



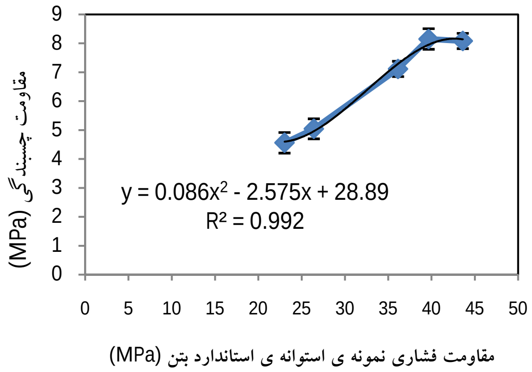
شکل ٤ آماده‌سازی نمونه‌های مکعبی با CFRP و انجام آزمایش «پیچش»

همان‌گونه که در شکل (٤) نشان داده شده است، برای تعیین مقاومت بتن و مقدار چسبندگی، از نمونه‌های بتنی مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری برای انجام آزمایش «پیچش» استفاده شده است. در این سری از آزمایش ها، چهار آزمون «پیچش» بر روی بتن و چهار آزمون «پیچش» بر روی CFRP چسبانده شده به بتن انجام گردید. مقاومت سطحی بتن و چسبندگی CFRP به بتن که با روش «پیچش» اندازه‌گیری گردیدند، با

نتایج حاصل از شکست نمونه‌های خمشی مقایسه شدند.

نتایج و تفسیر داده‌ها

با توجه به ارتباط بین مقاومت چسبندگی به‌دست آمده از روش «پیچش» و مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد، که برحسب مگاپاسکال در شکل (۵) نشان داده شده است، به‌نظر می‌رسد که در صورت استفاده از منحنی رگرسیون درجه‌ی دوم رابطه‌ی فیما بین دو عامل یاد شده با ضریب همبستگی ۰/۹۹۲ قابل توجیه است. از این شکل پیداست که با افزایش مقاومت بتن تا حدود ۴۰ مگاپاسکال مقاومت چسبندگی افزایش و سپس ثابت می‌ماند.

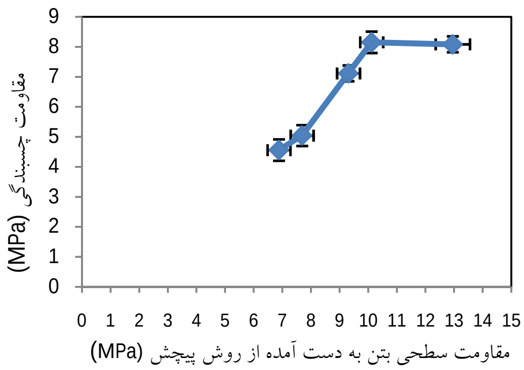


شکل ۵ تأثیر مقاومت فشاری بتن بر چسبندگی ورق‌های CFRP

جدول ۱ بار نهایی وارد بر تیرهای تقویت نشده و تقویت شده با CFRP

نمونه	مقاومت فشاری بتن (MPa)	بار نهایی وارد بر تیر بتنی تقویت نشده (kN)	بار نهایی وارد بر تیر بتنی تقویت شده با CFRP (kN)	ضریب افزایش مقاومت تیر بتنی
B1-1	23.03	10.3	26.7	2.59
B1-2	23.03	10.7	29.2	2.73
B2-1	26.42	10.7	28.9	2.70
B2-2	26.42	11.4	31.5	2.76
B3-1	36.13	13.2	37.1	2.81
B3-2	36.13	14.1	39.5	2.80
B4-1	39.67	14.7	41.6	2.83
B4-2	39.67	16	45.1	2.82
B5-1	43.62	14.9	40	2.68
B5-2	43.62	16	43.2	2.70

در شکل (٦) که رابطه‌ی مقاومت چسبندگی CFRP به بستر بتنی و مقاومت سطحی بتن به‌دست آمده از روش «پیچش» را نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده نمود که با افزایش مقاومت سطحی بتن تا حدود ۱۰ مگاپاسکال مقاومت چسبندگی یاد شده افزایش می‌یابد ولی پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند. شایان ذکر است که در آزمایش «پیچش» بر روی نمونه‌های با مقاومت بتن ۳۹/٦۷ و ٤۳/٦۲ مگاپاسکال در بعضی استوانه‌های فلزی بخشی از شکست در چسب و بخشی در بتن رخ داده است که در نتیجه مقاومت بتن را قدری (در حدود ۱۰ درصد) کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است.



شکل ٦ تأثیر مقاومت سطحی بتن بر چسبندگی ورق‌ها

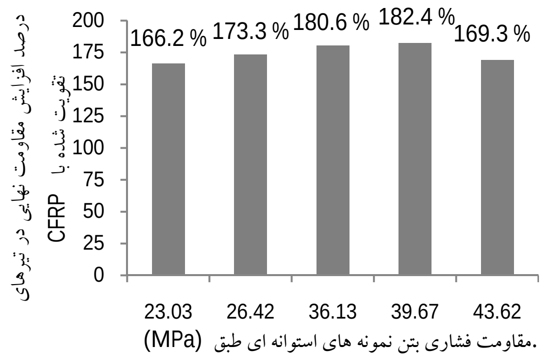
نتایج حاصل از تعیین ظرفیت باربری تیرهای ساده و تقویت شده با CFRP

در جدول شماره‌ی (۱) بار نهایی تحملی تیرهای هر سری در حالت تقویت نشده و تقویت شده با CFRP بر حسب کیلونیوتن نشان داده شده است که در ادامه با استفاده از میانگین این نتایج در هر سری نمودارهای مربوط ترسیم شده‌اند. جدول (۱) که حاوی مقاومت فشاری بتن همراه با بار نهایی تحملی تیرهای تقویت شده با CFRP و تقویت نشده می‌باشد، بیانگر آن است که افزایش مقاومت فشاری بتن بر نسبت افزایش مقاومت تیرهای تقویت شده و نشده تأثیر ثابتی ندارد چون با وجود افزایش مقاومت فشاری از حدود ۲۳ مگاپاسکال به حدود ٤٤ مگاپاسکال، نسبت یاد شده

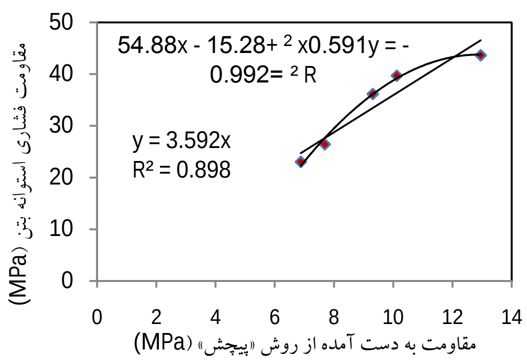
بین ۲/۵۹ تا ۲/۷۰ در نوسان می‌باشد، بدون این‌که رابطه‌ی ثابتی بین دو عامل یاد شده، قابل تعریف باشد.

تأثیر مقاومت بتن بردرصد افزایش مقاومت نهایی تیر بتنی تقویت شده با CFRP

همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، با افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن تا حدود ٤٠ مگاپاسکال، درصد مقاومت نهائی تیرهای تقویت شده افزایش یافته و پس از آن با افزایش مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن تا ٤٣/٦٢ مگاپاسکال شاهد رشد کمتری در درصدافزایش مقاومت تیرها می باشیم. با توجه به رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و سطحی بتن که در شکل (۸) نشان داده شده است، روند افزایش مقاومت نهایی تیرها نسبت به مقاوت سطحی نیز مشابه می‌باشد.

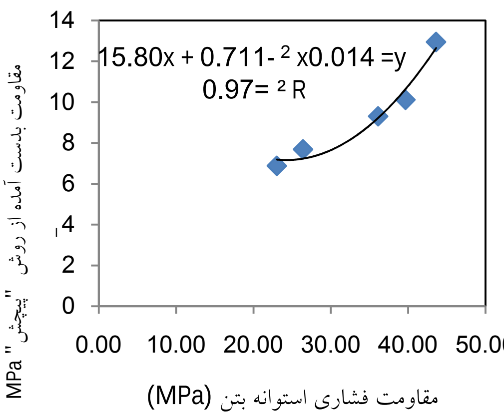


شکل ۷ تأثیر مقاومت بتن بردرصد افزایش مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP



شکل ۸ رابطه‌ی بین مقاومت سطحی و مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن

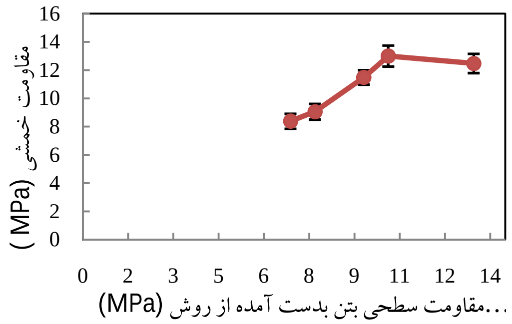
شکل (۹) که ترسیم مقاومت سطحی حاصل از روش «پیچش» را در مقابل مقاومت فشاری به‌دست آمده از استوانه‌ها نشان می‌دهد، بیان‌گر آن است که با افزایش مقاومت فشاری بتن، مقاومت سطحی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. البته باید توجه داشت که با مد نظر قرار دادن این‌که مقاومت سطحی بتن نقش اصلی را در عملکرد لایه‌های FRP ایفا می‌نمایند، نتایج به‌دست آمده از روش پیچش، کارایی بیشتری نسبت به نتایج حاصل از مقاومت‌های فشاری به‌دست آمده دارا می‌باشد.



شکل ۹ رابطه‌ی بین مقاومت فشاری استوانه‌ای و مقاومت سطحی بتن

تأثیر مقاومت سطحی بتن بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت‌شده با CFRP

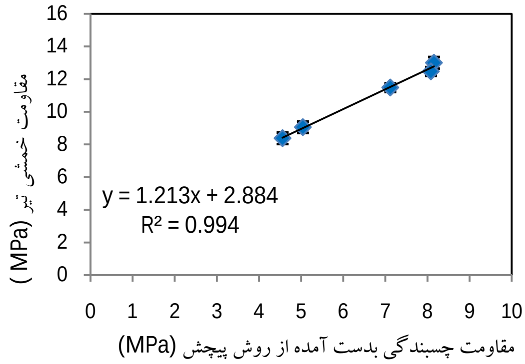
از شکل (۱۰) که در آن مقاومت سطحی بتن به‌دست آمده از آزمون «پیچش»، در مقابل مقاومت خمشی تیرها ترسیم گردیده است، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقاومت سطحی بتن تا حدود ۱۰ مگاپاسکال، مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت‌شده با CFRP نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت سطحی بتن به بیش از ۱۰ مگاپاسکال، تأثیری در مقاومت تیرهای تقویت شده نداشته است. احتمالاً این امر به‌دلیل ضعف در قسمت‌های دیگر تیر تقویت شده از جمله چسبندگی بین بتن و لایه‌ی CFRP می‌باشد که ظرفیت تحمل تیر را محدود می‌نماید.



شکل ۱۰ تأثیر مقاومت سطحی بتن بر مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده با CFRP

تأثیر مقاومت چسبندگی CFRP به بتن بر مقاومت خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP

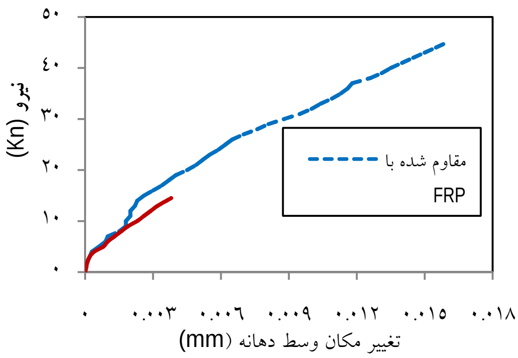
براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت بتن تا ۳۹/۶۷ مگاپاسکال، مقاومت چسبندگی CFRP به بتن بستر افزایش می‌یابد و در پی آن جداشدگی ورق دیرتر رخ می‌دهد و این امر سبب افزایش مقاومت خمشی تیر تقویت شده می‌گردد. همان‌طور که از شکل (۱۱) قابل مشاهده است، به‌طور کلی با افزایش مقاومت چسبندگی به‌دست آمده از روش «پیچش»، مقاومت تیرها به‌طور خطی افزایش می‌یابد. رابطه‌ی بین این دو دارای ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ می‌باشد.



شکل ۱۱ تأثیر مقاومت چسبندگی CFRP به بتن بر مقاومت تیر بتنی تقویت شده با CFRP

افزایش شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده با CFRP در راستای طولی تیر

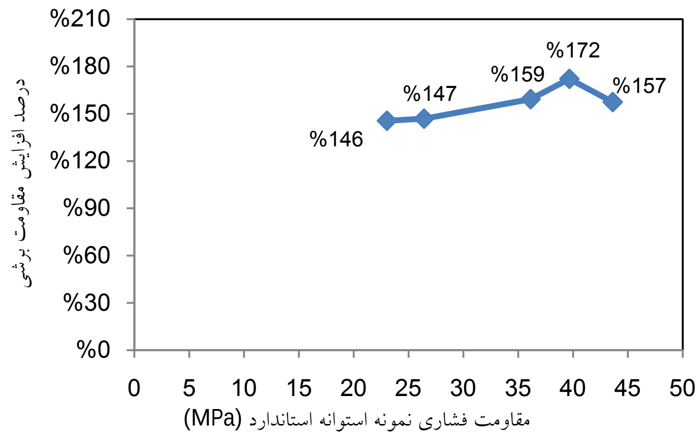
به‌منظور اندازه‌گیری خیز وسط دهانه، تغییرمکان‌سنج در زیر تیرها نصب گردید و با قرائت میزان خیز حاصل از اعمال نیروهای متفاوت، نمودارهای نیرو–تغییرمکان ترسیم شدند. به‌عنوان نمونه، در شکل شماره‌ی (۱۲) خیز صورت گرفته در وسط دهانه‌های تیرهای با مقاومت فشاری ۳۹/۶۷ مگاپاسکال به تصویر کشیده شده است. از این شکل به‌وضوح پیداست که شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده با CFRP به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است.



شکل ۱۲ نمودار نیرو–تغییر مکان تیرهای سری چهارم

افزایش مقاومت برشی تیرهای تقویت شده با CFRP در جهت طولی تیر

افزایش ظرفیت برشی تیرهای ساده به‌دلیل چسباندن لایه‌های CFRP، با توجه به تغییرات مقاومت فشاری بتن به‌کار گرفته شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. براساس این شکل مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت فشاری بتن بر مقاومت برشی تیرهای تقویت‌شده با CFRP در راستای طولی تیر، تأثیر مثبت داشته و بیشترین افزایش در نمونه‌های با مقاومت فشاری بتن ۳۹/۶۷ مگاپاسکال رخ داده است. البته باید توجه داشت که به‌دلیل وجود فقط یک قرائت پس از بیشینه درصد افزایش مقاومت برشی، به‌نظر می‌رسد نتیجه‌گیری قطعی در این خصوص با اشکال مواجه می‌شود، چون انتظار معقول این است که به‌دلیل استفاده حداکثری از مقاومت فشاری بتن، با تغییر نحوه شکست، منحنی مربوط پس از رسیدن به مقاومت بیشینه، به‌صورت افقی درآید.



شکل ۱۳ روند درصد افزایش مقاومت برشی تیرهای مقاوم‌سازی شده با CFRP



شکل ١٤ شکست تیرهای تقویت شده با CFRP

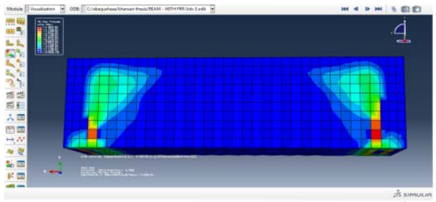
نحوه‌ی شکست در تیرها

مشاهده می‌شود که تمامی تیرهای بدون CFRP، از وسط و با ترک عمودی خمشی دچار شکست گردیده‌اند. دلیل این نوع شکست، وجود تنش‌های خمشی کششی در وسط دهانه به‌دلیل عدم وجود تنش برشی در آن قسمت می‌باشد. با دور شدن از وسط دهانه، از مقدار تنش خمشی کششی کاسته و به تنش برشی اضافه می‌شود که این امر باعث می‌شود تا ترکیب تنش‌های یاد شده بر نوع شکست حاصل اثر گذار باشد.

با مقایسه‌ی شکست نمونه‌های تیرهای تقویت شده با CFRP به‌وضوح مشخص است که عدم وجود آرماتورهای داخلی سبب باز شدن سریع ترک شده و ترک قطری اصلی از پایین تا بالای تیر به‌صورت مورب ادامه یافته است (شکل ١٤). این امر که موجب ایجاد تنش‌های زیاد در محل اتصال FRP با بتن می‌شود، باعث می‌گردد تا ورق FRP از سطح زیرین تیر و کناره‌های مقطع جدا شود. بعضی از محققان بر این باورند که به‌طور کلی آرماتورهای برشی محدود و کم، باعث ایجاد این نوع جداشدگی می‌شوند [3].

مدل‌سازی تیرها در نرم‌افزار Abacus

برای مدل نمودن رفتار تیرهای تقویت شده و تقویت نشده، نرم‌افزار Abacus مورد استفاده قرار گرفت. در همین راستا برای بررسی تغییرشکل‌های پلاستیک در تیر بتنی با ورق CFRP، شکل (١٥) ترسیم شده است که مربوط به تیر با مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین در این شکل، تنش‌های اصلی ایجاد شده که از نوع برشی می‌باشند، نشان داده شده‌اند. در مقایسه‌ی شکست تیرهای تقویت شده در آزمایشگاه با تحلیل های حاصل در شکل‌های (١٥) و (١٦) تطابق قابل‌قبولی مشاهده می‌شود.

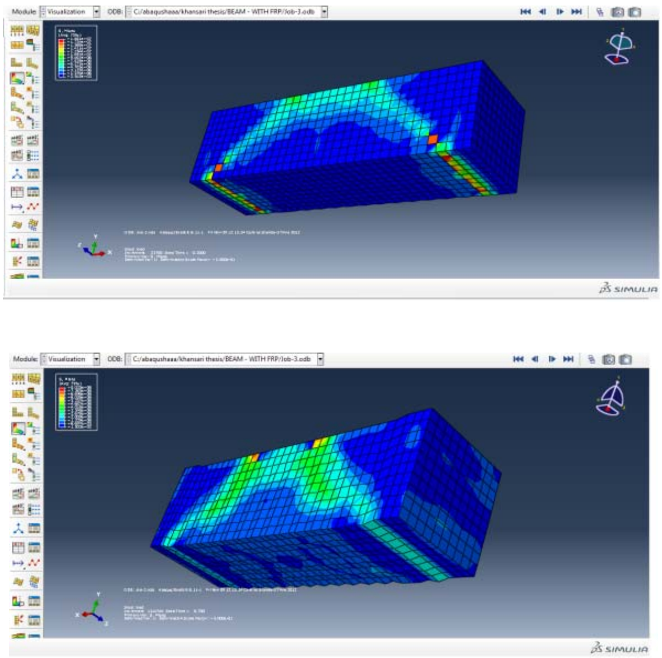


شکل ١٥ تغییرشکل پلاستیک در تیر بتنی با ورق CFRP، با مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال

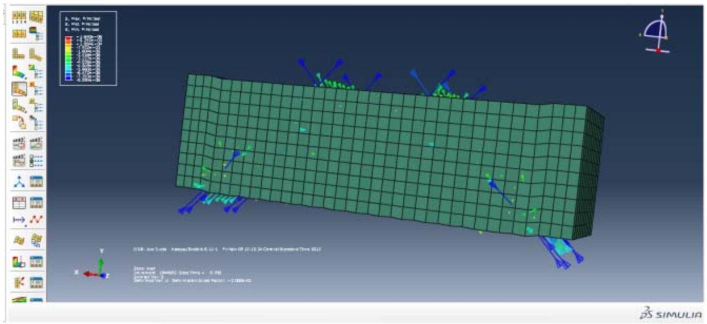
همچنین نحوه‌ی ایجاد نیروهای اصلی و جهت آن‌ها در تیر بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP، که دارای مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال می‌باشد، در شکل (١٧) ارائه شده است.

به‌منظور مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی، تیرهای تقویت شده با CFRP و تقویت نشده که دارای بتن با مقاومت ٢٣/٠٣ مگاپاسکال بودند در نرم‌افزار اجزای محدود Abacus مدل گردیدند که حاصل کار انجام شده در شکل (١٨) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بار نهایی به‌دست آمده با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارند.

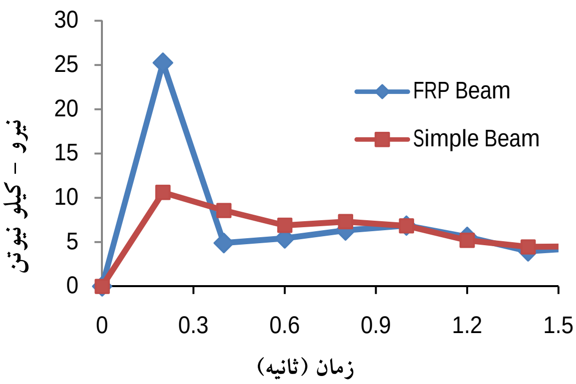
دقت نتایج و درصد تطابق مدل‌سازی اجزای محدود و قرائت‌های آزمایشگاهی بر روی تیرهای دارای مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال، در جدول (٢) ارائه گردیده است.



شکل ١٦ نحوه‌ی ایجاد تنش‌های اصلی در تیر بتنی با ورق CFRP، با مقاومت بتن ٢٣/٠٣ مگاپاسکال



شکل ۱۷ نحوه ایجاد نیروهای اصلی و جهت آن ها در تیر بتنی با ورق CFRP، با مقاومت بتن ۲۳/۰۳ مگاپاسکال



شکل ۱۸ نمودار تغییرات و مقدار نیرو در تیر تقویت شده با CFRP و تقویت نشده با مقاومت بتن ۲۳/۰۳ مگاپاسکال

جدول ۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی بر روی تیرها با مقادیر بدست آمده از نرم افزار Abacus

تیرهای با مقاومت بتن ۲۳/۰۳ مگاپاسکال	نتایج آزمایشگاهی	نتایج مدلسازی Abacus	تطابق نتایج
تقویت نشده	10.61	10.7	99%
تقویت شده با CFRP	26.7	25.2	94%

نتیجه‌گیری

از مطالب و نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ارائه شده در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که:

۱- بین مقاومت چسبندگی CFRP به بتن (به‌دست آمده از روش «پیچش») و مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای، منحنی رگرسیون تابع درجه دوم با ضریب همبستگی ۰/۹۹۲ برقرار می‌باشد.

۲- بین مقاومت سطحی بتن و چسبندگی CFRP به بتن حاصل از روش پیچش، مشاهده گردید که با افزایش مقاومت سطحی بتن تا ۱۰/۱۲ مگاپاسکال، مقاومت چسبندگی تا ۸/۱۵ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

۳- مشاهده گردید که تمامی تیرهای بدون CFRP، از وسط و با ترک عمودی خمشی دچار شکست

گردیدند. دلیل این نوع شکست، وجود تنش‌های خمشی کششی در وسط دهانه به‌دلیل عدم وجود تنش برشی در آن قسمت می‌باشد. با دور شدن از وسط دهانه، از مقدار تنش خمشی کششی کاسته و به تنش برشی اضافه می‌شود که این امر باعث می گردد تا ترکیب تنش‌های یاد شده بر نوع شکست حاصل اثرگذار باشد. با مقایسه‌ی شکست نمونه‌های تیرهای تقویت شده با CFRP به‌وضوح مشخص گردید که عدم وجود آرماتورهای داخلی سبب باز شدن سریع ترک‌ها می‌شود و ترک قطری اصلی از پایین تا بالای تیر به‌صورت مورب ادامه می‌یابد.

٤- با افزایش مقاومت فشاری بتن از حدود ٢٣ مگاپاسکال تا حدود ٤٠ مگاپاسکال، درصد افزایش مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده از ١٦٦/٢ درصد به ١٨٢/٤ درصد افزایش یافت.

٥- با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون «پیچش» این نتیجه به‌دست می‌آید که با افزایش مقاومت سطحی بتن از ٦/٨٨ تا حدود ١٠ مگاپاسکال، مقاومت خمشی (نهایی) تیرهای بتنی تقویت‌شده با CFRP از ٨/١٣ به ١٣ مگاپاسکال افزایش و پس از آن با افزایش مقاومت سطحی بتن تا ١٢/٩٥ مگاپاسکال حدود ٠/٦ مگاپاسکال کاهش می‌یابد .

٦- افزایش مقاومت چسبندگی CFRP به بتن از ٤/٥٦ تا ٨/١٥ مگاپاسکال، مقاومت تیرهای تقویت شده با CFRP را به‌طور خطی افزایش داد و ضریب همبستگی ٠/٩٩٤ مشاهده گردید.

٧- با افزایش مقاومت فشاری بتن از ٢٣ مگاپاسکال تا حدود ٤٠ مگاپاسکال، درصد افزایش مقاومت برشی تیرهای تقویت شده از ١٤٦ درصد تا ١٧٢ درصد افزایش یافت.

٨- شکل پذیری تیرهای بتنی پس از مقاوم‌سازی با CFRP به‌طور قابل‌ملاحظه افزایش یافت.

مراجع

1. M. Klees, R. Kautsch, "Sachstandsbericht zur Bemessung von Bauteilen mit Klebeverstärkung", Technische Universität Kaiserslautern, Massivbau und Baukonstruktion Prof. Dr.-Ing. J. Schnell, (2004).
2. M. Arduini & A. Nanni, "Parametric study of beams with externally bonded FRP reinforcement", *ACI Structural Journal*, 94(5), 493–501. (1997).
3. M. Naderi, "Effects of Cyclic Loading, Freeze-Thaw and Temperature Changes on Shear Bond Strengths of Different Concrete Repair Systems", *Journal of Adhesion*, vol. 84, no. 9, pp. 743-763, (2008).
4. Naderi, M., "Twist-off method for assessing material strength and their bond", Islamic Republic of Iran. Patent No. 23936 (2007).
5. M. Naderi, "New Twist-Off Method for the Evaluation of In-Situ Strength of Concrete", *Journal of Testing and Evaluation Volume 35*, Issue 6, (2007).
6. M.J. Chajes, WW. Finch, TF. Januszka, TA. Thomson, "Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete", *ACI Structural Journal*, V. 93, No. 2., pp. 208-17, (1996).
7. T. Horiguchi, N. Saeki, "Effect of Test Methods and Quality of Concrete on Bond Strength of CFRP

Sheet", Proceedings of the 3rd International Symposium (FRPRCS-3), Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol. 1., pp. 265-70, (1997).

8. Y . Sato, Y. Asano, T. Ueda, "Fundamental Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet", Concrete Library of JSCE, Japan, Vol. 37., pp. 97-115, (2001).
9. K . Nakaba, T. Kanakubo, T. Furuta, H . Yoshizawa, "Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp. 359-67, (2001).
10. Jm. Sena-Cruz, Jao. Barros, "Bond Behavior of Carbon Laminate Strips into Concrete by Pullout-Bending Tests," Proceedings of the International Symposium Bond in Concrete--from Research to Standards, pp. 614-21,(2002).
11. J. Wambold, J. Henry, "Evaluation of Pavement Surface Texture, Significance and measurement Techniques", Wear, Vol. 83, No. 2 , pp. 351-68, (1982).
12. A. Abu-Tair, D. Lavery, A. Nadjai, SR. Rigden, TMA. Ahmed, "A New Method for Evaluating the Surface Roughness of Concrete Cut for Repair or Strengthening", Construction and Building Materials, Vol. 14, No. 3, pp. 171-6, (2000)
13. C .Talbot, M. Pigeon, D. Beaupré, DR. Morgan, "Influence of Surface Preparation on Long-Term Bonding of Shotcrete", *ACI Materials Journal,*Vol.91, No. 6, pp. 560-6, (1994).
14. E. Júlio, F. Branco, V. Silva, "Concrete-to-Concrete Bond Strength. Influence of the Roughness of the Substrate Surface", Construction and Building Materials, Vol. 18, No. 9, pp. 675-81, (2004).
15. P. Santos, E. Júlio, V. Silva, "Correlation between Concrete-to-Concrete Bond Strength and the Roughness of the Substrate", Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 8. pp. 1688-95, (2005).
16. H .Yoshizawa, T. Myojo, M. Okoshi, M. Mitzukoshi, HS. Kliger, "Effect of Sheet Bonding Condition on Concrete Members Having Externally Bonded Carbon Fiber Sheet", *Proceedings of the 4th Materials Engineering Conference,* Materials for the New Millennium, Vol. 2, pp. 1608-16, (1996).
17. H. Toutanji, G. Ortiz, "The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members", Composite Structures, Vol. 53, No. 4, pp. 457-62,(2001).
18. M. Mitsui, K. Fukuzawa, T. Numao, I. Fuda,"Relations between Surface Roughness Indexes and Bond Strength between CFRP Sheets and Concrete", *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 49, No. 6, pp. 685-91, (2000).
19. M. Matana, G. Galecki, N. Maerz, A. Nanni, "Concrete Substrate Preparation and Characterization Prior to Adhesion of Externally Bonded Reinforcement", Proceedings of the International Symposium on Bond behavior of FRP in Structures, pp. 133-9, (2005).
20. JJ. Myers, J. Jeffries, X. Shen, "Effect of Varied Surface Roughness and Concrete Strength on the Bond Performance of FRP Fabrics", *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced*

Composites in Construction, ACIC, pp. 232-42, (2007).

21. G. Li, A. Ghebreyesus, "Fast Repair of Damaged RC Beams Using UV Curing FRP Composites", Composite Structures, Vol. 72, No. 1, pp. 105-10, (2006).
22. JG . Dai, T. Ueda, Y. Sato, "Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 1, pp. 52-62, (2005).
23. JG. Dai, Y. Sato, T. Ueda, "Improving the Load Transfer and Effective Bond Length for FRP Composites Bonded to Concrete", Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol. 24, No. 2, pp. 1423-8, (2002).
24. B. Gao, JK. Kim, CKY. Leung, "Experimental study on RC beams with FRP strips bonded with rubber modified resins", Composites Science and Technology, Vol. 64, No. 16, pp. 2557-64, (2004).
25. H .Yoshizawa, Z. Wu, H. Yuan, T. Kanakubo, "Study on FRP-Composite Interface Bond Performance", *Journal of Materials,* Concrete Structures and Pavements of JSCE, Vol. 662, No. 49, pp. 105-19, (2000).
26. S. Benyoucef, A. Tounsi, EA. Adda Bedia, SA. Meftah, "Creep and Shrinkage Effect on Adhesive Stresses in RC Beams Strengthened with Composite Laminates", Composites Science and Technology, Vol. 67, No. 6, pp. 933-42, (2007).
27. H. Thomas , K. Kang, J. Howell, S. Kim and D. Joo Lee, "A State-of-the-Art Review on Debonding Failures of FRP Laminates Externally Adhered to Concrete", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.6, No.2, pp.123–134, June (2012).
28. O. Buyukozturk, O. Gunes, E. Karaca, "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites", Construction and Building Materials, 18, 9–19, (2004).
29. M. Naderi, "Using Twist-Off Method for Measuring Surface Strength of Concretes Cured under Different Environments", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 385-392, (2011).
30. M. Naderi, "Analysis of the Slant Shear Test", *Journal of Adhesion Science and Technology - J adhes sci technol,* Vol. 23, no. 2, pp. 229-245, (2009).
31. ASTM C 1609/C 1609M – 05, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete", (Using Beam With Third-Point Loading).
32. "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures", Technical Report, Task Group 9.3, Bulletin No. 14. The International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, (2001).